

# ROS Arm 研究報告

本研究主要開發基於 ROS (Robot operating system) 的工業型六軸機器人，進行輕切削的工作。在此研究中，我們整合遠端控制，機器人路徑軌跡規劃，機器手臂控制等概念，解決 ROS 下 real-time 的問題，手臂精準度的控制。

## 研究目的與動機

近年來由於自動化產業的發達，使工業技術的提升突飛猛進，智慧製造更是現今許多企業以及國家所追求的目標。以往以人力為主的加工製造程序方式，也因為社會低生育率以及勞工成本的上升而受到影響，因此未來以自動化為主的智慧生產方式更是勢在必行。除此之外，由於目前市場上產品壽命週期縮短，科技廠商需要面對越來越多小量、客製化的需求。近年 3D 印表機的興盛，正反映了這樣的趨勢——「自造」的風潮興起，不論是家庭還是公司，都開始利用 3D 印表機製作可直接使用的零組件，或是設計打樣、甚至是利用 3D 列印件來進行機構研發。

然而 3D 印表機的興起，並不能完全解決小量、客製化零件的問題。由於 3D 印表機所使用材料多是塑料，材料強度上大大限制了零件的可用性。如果要生產金屬零組件，或是希望採用如木材等材質，就不是一般 3D 印表機可以處理的。因此我們認為，如果要真正讓廠商得以客製化各種材質零件，光只有 3D 印表機是不夠的，我們還需要 CNC 這類型的傳統加工機。然而 CNC 絕對不是一般家庭、公司所考量購入之工具，不論是養護成本還是佔用空間，對小量需求使用者而言，都無實質購入必要性。因此我們思考，該如何讓一般使用者能擁有 CNC 以彌補 3D 印表機的不足，又沒有傳統 CNC 的缺點呢？

我們的答案是：機械手臂。目前協作型機器人逐漸興盛，多是以機械手臂的形態存在，如國內的達明機器人公司所生產之 TM5 機械手臂，或是國外 Universal Robots 所生產之 UR5、UR10 機械手臂，未來將有機會逐漸進入工廠進行人機協作智慧化生產，甚至是進入到家戶當中，成為家庭任務的助手。機械手臂末端工具能夠任意更換，那麼為甚麼不能拿來進行 CNC 工作呢？如此一來，就省去了 CNC 的養護成本與占用空間，使用者僅需維護機械手臂，就能進行各式各樣的任務，包含協同工作、CNC，甚至取代 3D 印表機都有可能。除此之外，讓機械手臂進行 CNC 任務，其工作空間不會如同傳統 CNC 機台般受限，甚至可以在將來結合手臂車的概念，那麼工作範圍上就不會有任何限制了！

因此我們這次聚焦於使用機械手臂來進行 CNC 任務，定調於小量、客製化、高度彈性生產。為了更親近使用者，我們設想一個情境：使用者對於想要客製化的零組件，只需要將設計圖檔透過手機、平板上傳到雲端，在伺服器進行數據計算後，直接將切削策略傳送到機械手臂，便能自動化進行零組件生產。如此一來，使用者便能相當輕易得到客製化零組件，彌補了 3D 印表機材質上的限制，也不用如同以往將設計圖送到工廠開模生產，或是負擔 CNC 高額的維護成本。廠商也可以基於這樣的策略訂定各種商業模式，例如提供機械手臂末端切割機具、切割材料，以及提供伺服器處理設計圖檔等等，透過零件大小來進行收費，不失為一種商業模式考量。

除此之外，這次我們的機械手臂採取了與台灣加工機廠商相當不同的作業系統：Linux。目前國內機械手臂由於軟體供應商支援度、生態系統等考量，多半採用 Real Time Windows，鮮少見到採用 Linux 的廠商。我們選擇 Linux 的主要原因在於希望示範給國內廠商一種國際上早已風靡、行之有年的機器人控制工具：Robot Operating System (ROS)。ROS 是一種開源、基於 Linux 開發的機器人控制架構，擁有各式機器人任務良好的解決方案，以及遍布全球的廣大社群資源。因為在 Linux 上，少見台灣廠商支援，我們也必須自行解決 Real Time 以及機器人底層通訊的問題。幸運的是，這兩大機器人控制問題，在同學們的努力下，都獲得了完善的解決，將在這份構想書當中詳細說明。

## 研究內容

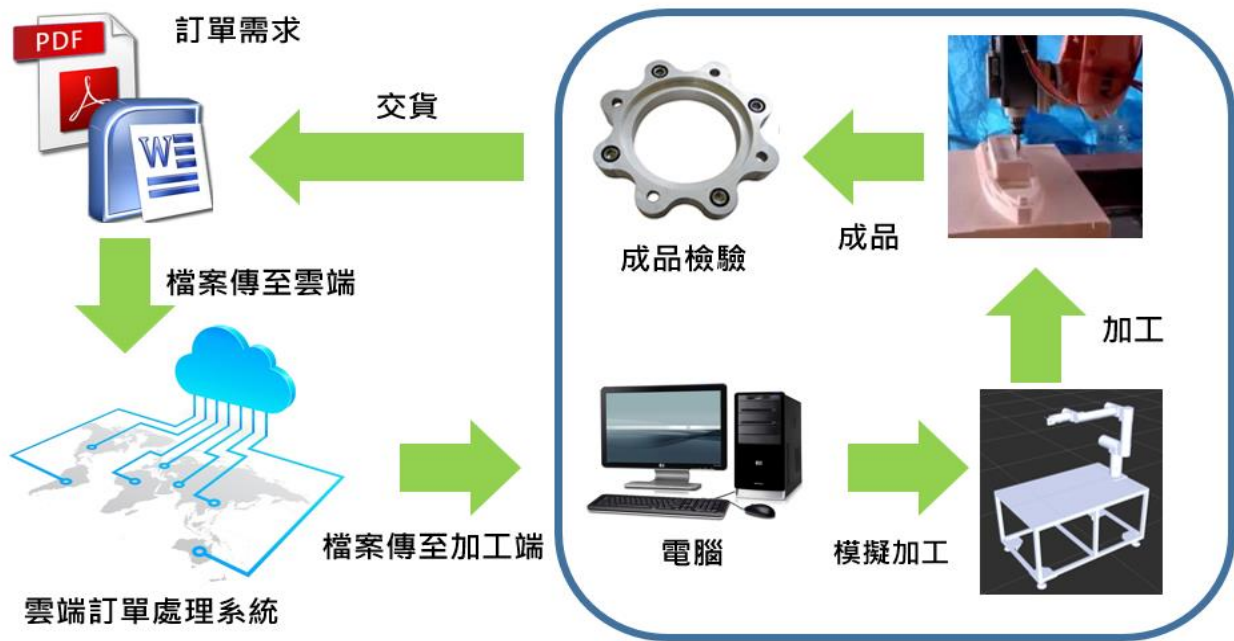


Fig.1 系統架構圖

如上圖所示，我們的系統包含以下數個部分：

### (1) 訂單檔案處理系統：

由於客戶可能來自全球各個地方，因此首先訂單會依照客戶的區域進行分類，並且依照最新的檔案上傳日期做排序，以方便雲端系統的管理。如此不但能有系統的整合來自各區域的訂單，同時還能夠即時的取得最新的訂單通知。同時，也能增進全球化製造的整合，像是以台灣為主的製造統合端，不只能夠製造，還能直接從台灣對美國的分廠即時調度，便能夠及時的對美洲區域的客戶進行第一線加工生產出貨，而在歐洲的分廠也能如此。

這樣不但符合了全球分工的概念，也徹底落實了工業 4.0 的智慧製造，即時面對來自不同客戶端的需求，以達到有效的管理，客戶同時也能夠使用雲端系統來查看了解他們的產品進程，方便客戶在加工程序上有疑慮時能夠即時的回饋，以減少成本的損失。

### (2) ROS (Robot Operating System)：



Fig. 2 ROS 及其週邊配合套件，包含 Moveit(控制機械手臂)，Gazebo (物理模擬環境) 以及 Rviz (機器人行為監看軟體)

ROS 是近年來興起的機器人操作平台，其中更不乏許多的機器人開發套件，如：Moveit, Rviz 等等，其核心概念是希望以其平台提供多樣化的軟件，幫助使用者在開發機器人上能夠更方便。ROS 中更有提供機械手臂系統的資訊，像是轉換座標系統所需要的 Pose (Position and Orientation)，還有機器人即時的环境監控系統，同時還有能夠模擬機器運行的軟件，如 Gazebo。擁有如此強大功能的 ROS 系統，只要善用其工具以及優點，不只能夠幫助我們加速產品開發進程，同時也能夠在開始執行任務時，先進行一定的穩定度評估。

ROS 不只可以因為其軟體平台的方便性以及通用性擴充到不同的機器工作平台，更能方便我們控制機器協作以及製造端的品質監控，善用其通訊特色，可以幫助我們更簡單的邁向工業 4.0 的智慧製造目標。

### (3) 電腦模擬：

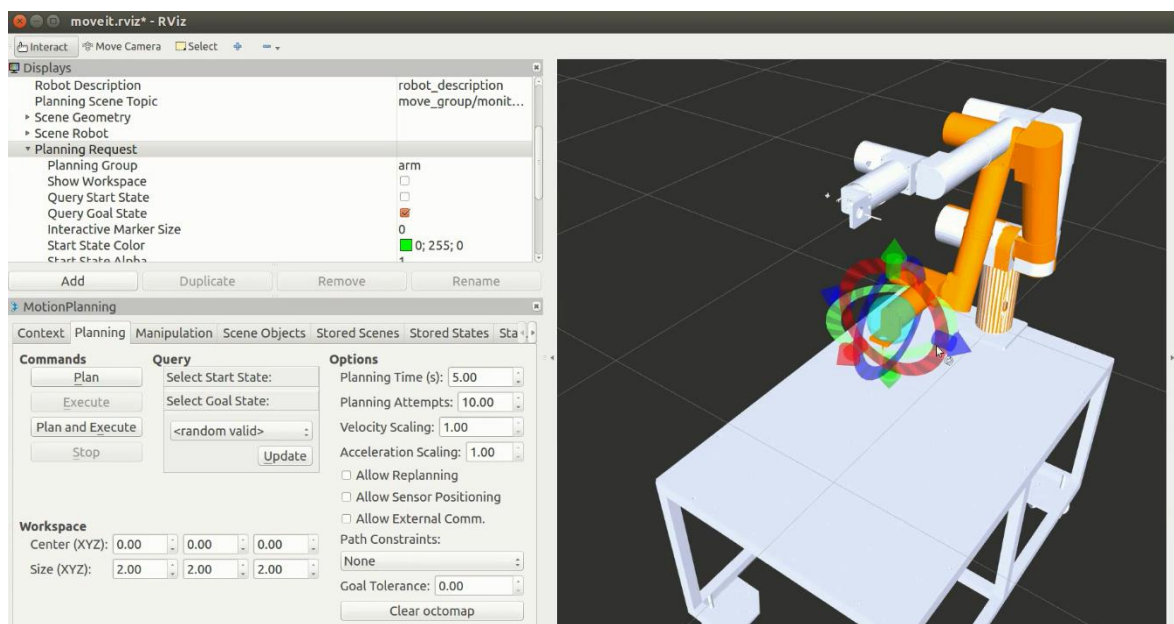


Fig.3 利用 Moveit 對機械手臂進行路徑規劃，同時也可以在此環境中進行模擬切削，我們將完整過程拍攝於影片中。

當電腦從網路得到加工檔案後，我們可以藉由檔案轉換成所需的工作點以及軌跡，給予機器手臂工作座標點，讓手臂可以模擬出其加工的順序以及成果，並且以動畫呈現，這也是為什麼我們選用 ROS 做為開發平台的原因。

### (4) 實際加工：

當模擬完畢後，便能進行實際的加工。只要從控制端輸入選擇的材料，給予手臂正確的加工器具，就能開始進行產品切削。也可以使用多台機械手臂協作，透過不同功能的 End Effector，讓一隻手臂夾取材料，另一隻手臂照著正確的加工順序來切削。當產品完成後，也能夠透過協作，將完成的成品放置到所需要的地方。如此一來，便能達到最有效率的加工以及生產方式。跟 CNC 加工機以及傳統的切削加工機相比，機器手臂明顯地更能輕易達到我們所需要的加工目標。

## 機構設計

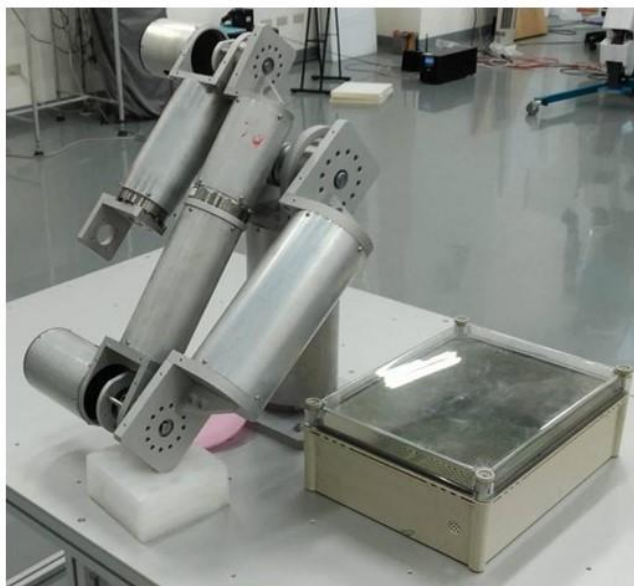


Fig.4 左圖是我們的機械手臂設計；右圖是尚未配線的純機構，目前仍在製作當中。

### (1) 機器人本體設計：

設計機械手臂重要的考量點之一是負載重量，由於我們希望這隻機械手臂除了進行 CNC 切削工作之外，將來還要能夠進行其他應用，包含人機協作、貨物搬運、零件組裝等等。我們將他的負載設為約莫 10kg 進行推算，並且仿照 UR10 的馬達規劃來進行我們手臂設計。除此之外，我們希望整隻機械手臂皆是國產零件（除了 Harmonic Drive 需要從日本進口），並且能夠運行 ROS，為國內廠商做一個 ROS 機器人的示範平台。

原先我們希望能夠像 UR10 一樣採用直流馬達，然而由於國內大廠較少見得生產直流馬達，而我們機械手臂由於精度與耐用度考量，需要採用高品質的馬達，因此若要採用直流馬達可能就需要從國外進口。然而我們仍然希望整隻手臂國產國造，因此決定全數採用台達電子的交流馬達以及驅動器，也讓國內廠商未來容易學習、仿照。除此之外，由於這是我們第一次設計交流馬達機械手臂，經驗尚不足夠，因此我們採用較保守的設計，所有關節皆採用直驅，不使用皮帶輪等等傳動機構，以降低變數、精度誤差。

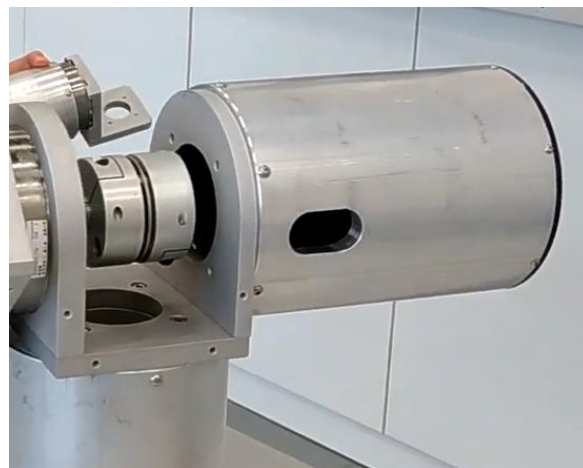


Fig.5 我們採用保守設計，讓馬達直接驅動各關節，以降低精度誤差。

### (2) 硬體選用：

#### i. 驅動器：

由於目前國際上多數機器人底層採用的通訊協定為 EtherCAT 與 Powerlink 兩種，而台達電子有生產 EtherCAT 驅動器，我們便採用 EtherCAT 作為我們底層通訊協定。我們使用 ASDA-A2-E 系列控制器，其通過 EtherCAT 官方測試，支援 ECMA 馬達。

#### ii. 馬達：

由於驅動器因素，我們採用 ECMA 馬達。除此之外，考量到機器手臂歸 home 問題，我們採用絕對型編碼器，並且在第二、三、四、五軸（手臂上含有 z 軸方向自由度的關節）採用帶煞車的馬達，以防緊急停止時手臂鬆落毀損。



Fig.6 台達電 ASDA-A2-E 驅動器與 ECMA 馬達，支援 EtherCAT 通訊協定。

### (3) 軟體：

軟體是我們這隻手臂最大的特色，所有控制軟體皆是 Open Source 計畫，如下說明：

#### i. ROS (Robot Operating System)：

ROS 是基於 Linux 平台所開發出來的機器人控制架構，國外學術界與業界早已風靡、行之有年，然而至今國內仍少見學術界跟進，業界也遲遲未聞。ROS 的好處在於開放原始碼，高度彈性，網路資源相當豐富，穩定性、完善度也相當好。舉一個例子，一般來說，設計機械手臂時需要考量 IK 是否好解，也必須要基於手臂自由度、結構來調整 IK 解法，是一個相當費工夫的流程。然而在 ROS 當中，這幾乎不是問題。由於廣大網路社群的貢獻，ROS 當中有一個計畫叫做 Moveit，專門控制機械手臂，IK 問題在數年前早已解決了。我們使用 Moveit 來控制機械手臂，毋需考量手臂結構、自由度，只要將模擬圖匯入 ROS 當中，便可以交給 Moveit 來解 IK，同時還會提供 Motion Planning 以及 Collision Avoidance。因此在我們完成手臂模擬圖之後，便可以直接開始進行模擬，完全毋需煩惱 IK，大幅提昇研發的速度，這一點可以在我們拍攝的影片中詳細看到。

ROS 當中還有提供叫做 ROS Control 的工具，可以即時控制各個關節馬達，為他們進行目標點內插，來提供平滑（位置、速度、加速度連續）手臂運動軌跡，我們亦使用 ROS Control 來進行這隻機械手臂的控制。

#### ii. SOEM (Simple Open EtherCAT Master)：

SOEM 是 Linux 環境中擁有完善社群支援的 EtherCAT Library。由於工業手臂需要高精度控制，我們希望控制頻率達到 1000Hz，因此我們使用 SOEM 對驅動器採用 PDO Mapping，使用對應的 Object 便可進行位置控制、速度控制或是力矩控制。除此之外，使用 SOEM 一方面可以與 ROS 結合，也讓我們不需要額外的 EtherCAT 主站裝置，機械手臂使用的電腦就可以直接當作 EtherCAT 主站。

### iii. Xenomai 與 Orocos :

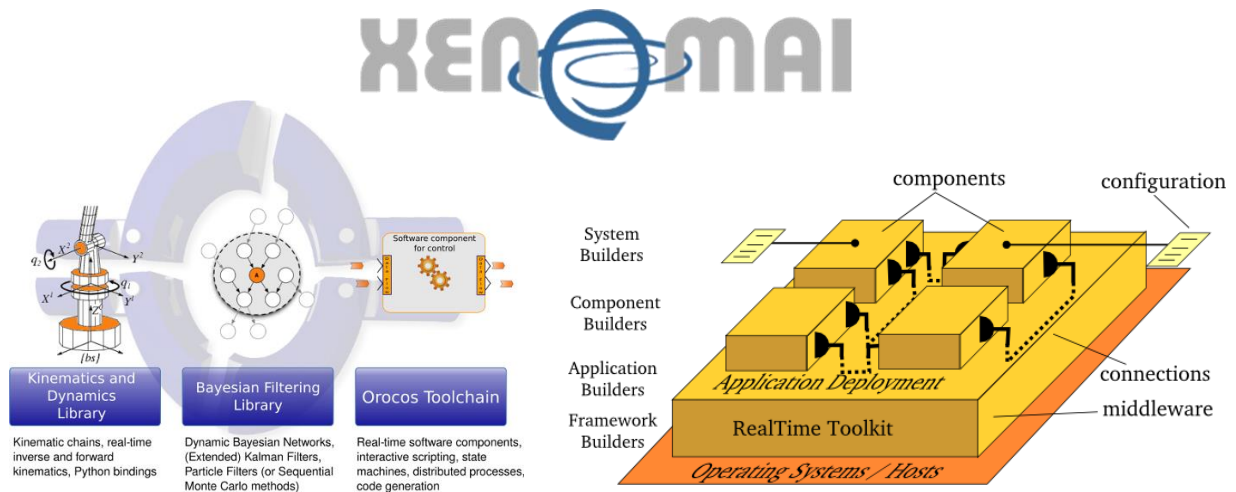


Fig.7 透過 Xenomai 將 Linux 核心編譯成 real time kernel，再透過 Orocos 作為中間層，就可以讓 ROS 在 hard real time 環境中運行。

由於機械手臂的高精度要求，我們必須讓控制命令遵循 Hard Real Time。在 Windows 底下，需要由廠商提供付費支援，然而在 Linux 底下，Xenomai 是一個擁有廣大社群免費支援的 Real Time 解決方案。我們利用 Xenomai，將我們的 Linux 作業系統轉換成 Hard Real Time 來對機械手臂進行控制，就能達到傳統 Windows 需要付費支援的任務。

Orocos 是一套類似於 ROS 的機器人控制解決方案，然而他並沒有如同 ROS 蓬勃發展，使用者社群並不大。不過他卻有相當好的 Real Time 整合，這是 ROS 所不及之處，因此我們利用 Orocos 來結合 ROS 與 Xenomai，達成在 ROS 中 Real Time 控制機器人。

### 實驗成果

我們選用一些知名的汽車 Logo 來進行切削實驗。



Fig.8 各種一級汽車 Logo 切削成果

## 製作成本概估與未來產業價值

### (1) 人力投入與時間成本

本團隊投入的設計時間至今約 4 個月，其中也包含了與許多廠商在機構設計以及實際製作所需要的關鍵零組件洽詢。

### (2) 製作成本

本次作品主要使用的關鍵零組件如下：

| 項目                      | 數量        | 廠牌   | 國產 | 進口 | 單價        |
|-------------------------|-----------|------|----|----|-----------|
| 驅動器(100W)               | 4         | 台達電子 | ●  |    | 15,980 元  |
| 驅動器(400W)               | 1         | 台達電子 | ●  |    | 16,980 元  |
| 驅動器(750W)               | 2         | 台達電子 | ●  |    | 17,980 元  |
| 伺服馬達(100W 帶煞車)          | 2         | 台達電子 | ●  |    | 13,980 元  |
| 伺服馬達(100W)              | 2         | 台達電子 | ●  |    | 9,980 元   |
| 伺服馬達(400W 帶煞車)          | 1         | 台達電子 | ●  |    | 15,980 元  |
| 伺服馬達(750W 帶煞車)          | 1         | 台達電子 | ●  |    | 17,980 元  |
| 伺服馬達(750W)              | 1         | 台達電子 | ●  |    | 11,980 元  |
| 絕對式 Encoder Cable       | 7         | 台達電子 | ●  |    | 6,031 元   |
| Power Cable             | 3         | 台達電子 | ●  |    | 3,586 元   |
| Power Cable 帶煞車         | 4         | 台達電子 | ●  |    | 3,735 元   |
| 鋁擠型工作桌                  | 1         | 唯晟科技 | ●  |    | 42,000 元  |
| 電供箱                     | 1         | 唯晟科技 | ●  |    | 6,000 元   |
| 手臂外殼加工                  | 1         | 唯晟科技 | ●  |    | 322,000 元 |
| Harmonic Drive (25-100) | 2         |      |    | ●  | 34,545 元  |
| Harmonic Drive (20-100) | 2         |      |    | ●  | 33,075 元  |
| Harmonic Drive (17-50)  | 2         |      |    | ●  | 29,474 元  |
| 合計                      | 842,823 元 |      |    |    |           |

### (三) 未來產業價值

如上所述，本組所提出的系統架構在加工製造產業上具有極大的實用性與擴充性，更是未來智慧加工不可或缺的重要進程，未來我們將針對本組之機器人末端進行更廣泛的應用、加工程序的改良、又或者是進行更多加工工具的試驗。以期能夠達成任何空間下皆能成功完成加工程序，並且更進一步的改善機器手臂加工時的穩定性以及精準度和成品精細度。

除此之外，軟體全數使用開源計畫，因此高度彈性可以修改程式碼，亦毋需支付任何費用，還有廣大的網路社群支援。我們希望讓國內廠商認識 ROS 這套控制架構、與國際接軌，也可即時跟上國際最新研究成果所釋出的原始碼，加速國內研發進度。如果國內對於這套控制架構掌握得好，第一個是不需重新發明輪子，許多已經有良好解決方案的套件可以直接使用，大幅降低研發成本；第二是除了業界之外，還能開發學術界市場，包含各大學、研究所，甚至是連同教育市場一起開發，推出機器人學習套件給一般學生參與，也可提供軟體端的穩定性維護等等，市場價值不可限量。

### (四) 產品市場分析

| 比較     | 機器手臂<br> | CNC<br> |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 工作空間   | 自由                                                                                        | 侷限                                                                                         |
| 機台佔用空間 | 較小                                                                                        | 較大                                                                                         |
| 機械成本   | 低                                                                                         | 高                                                                                          |
| 機器維護   | 方便                                                                                        | 複雜                                                                                         |
| 末端加工方式 | 多樣化                                                                                       | 較為單一                                                                                       |

## 結論

本組期望能以此設計之新型機器手臂，為國內廠商做一個示範平台，表明全數使用國產零組件、開源計畫是一套可行的解決方案。除此之外，此手臂之工作，能以輕量化的概念，針對較為客製化的族群，以及諸多較為小型而客製化的零組件進行加工，並能克服 CNC 工作空間的工作限制。在比 CNC 更為自由的工作空間，以及較為多樣化的 End Effector 更換，機器協作等等，讓機器手臂可以方便解決較難開模之工作以及樣品加工，節省成本開發，並且提高工作速度，以快速達到客戶之客製化需求。

我們更規劃了未來可行並且能持續改進的方向：

### (1)全球製造的中央管理系統：

藉由雲端的即時管理，能夠了解全球各地的客戶需求，並且能夠以成本及利潤，現在工廠所具有的材料，空間，以及客戶完成成品的複雜度來做評估，已達成最有效率的製造，實現更有效率的智慧製造。

### (2)加工成品的品質控管：

當一產品初次加工，但是其品質不良，下次出現類似的客製化需求，能夠將曾經相似的專案藉由雲端檔案管理系統做一統整以及參考，以幫助下次製造時的效率以及品質提升。

### (3)智慧協作的效率優化：

在雲端中處理好資訊，再將資訊送達給所需要工作的機器手臂中，藉由設定好手臂之間協調的工作以及任務分派，在這一系列的搬運、加工、甚至成品裝箱都能藉由手臂一起完成，而不需要任何人員協助。

除此之外，我們更希望能藉由軟硬體的整合，以及雲端的利用，幫助國內廠商能在全球地即時回應客戶的需求，實現少量多樣化的智慧製造，並且以 ROS 平台降低業界與學術界的技術落差和鴻溝。我們希望以此次比賽為出發點，帶領國內廠商接軌國際，以智慧製造作為新一波的產業轉型，並期望產業界與學術界能共生共榮。